

## OPTICAL ELEMENT, OPTICAL WAVELENGTH CONVERTING ELEMENT AND GENERATOR OF SHORT WAVELENGTH LIGHT

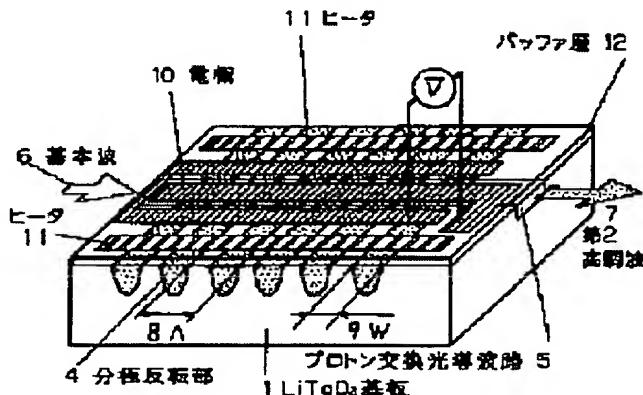
**Patent number:** JP7270632  
**Publication date:** 1995-10-20  
**Inventor:** MIZUUCHI KIMINORI; YAMAMOTO KAZUHISA  
**Applicant:** MATSUSHITA ELECTRIC IND CO LTD  
**Classification:**  
 - **international:** G02B6/12; G02B6/122  
 - **European:**  
**Application number:** JP19940057329 19940328  
**Priority number(s):** JP19940057329 19940328

[Report a data error here](#)

### Abstract of JP7270632

**PURPOSE:** To stabilize the output of an optical wavelength converting element by controlling the phase matching wavelength.

**CONSTITUTION:** This optical wavelength converting element is produced by forming a polarization reversed layer 4 and a proton-exchanged optical waveguide 5 on a LiTaO<sub>3</sub> substrate 1. The electric field applied on the optical waveguide 5 and temp. are controlled with electrodes 10 and a heater 11 to control the refractive index of the optical waveguide 5. By controlling temp., the refractive index can be modulated in a wide range. By combining with controlling of the electric field, fast modulation can be obtd. As a result, the phase matching wavelength of the optical wavelength converting element can be fast controlled in a wide range. Thereby, the phase matching wavelength of the optical wavelength converting element which is changed by environmental temp. or the like can be controlled to obtain stable output.



Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平7-270632

(43)公開日 平成7年(1995)10月20日

(51)Int.Cl.<sup>6</sup>

識別記号

庁内整理番号

F I

技術表示箇所

G 02 B 6/12  
6/122

G 02 B 6/12

H  
J  
A

審査請求 未請求 請求項の数15 O L (全 13 頁)

(21)出願番号 特願平6-57329

(71)出願人 000005821

松下電器産業株式会社  
大阪府門真市大字門真1006番地

(22)出願日 平成6年(1994)3月28日

(72)発明者 水内 公典

大阪府門真市大字門真1006番地 松下電器  
産業株式会社内

(72)発明者 山本 和久

大阪府門真市大字門真1006番地 松下電器  
産業株式会社内

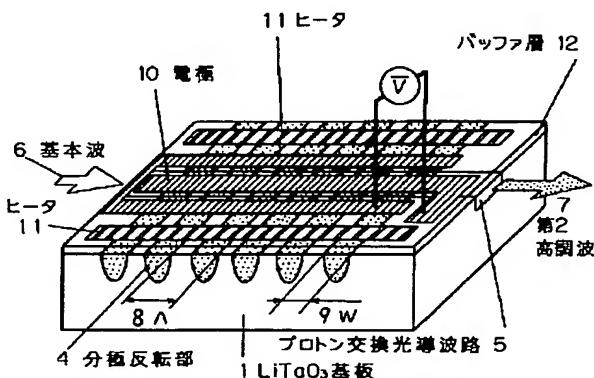
(74)代理人 弁理士 小鍛治 明 (外2名)

(54)【発明の名称】 光素子および光波長変換素子および短波長光発生装置

(57)【要約】

【目的】 位相整合波長を制御することにより光波長変換素子の出力安定化を図る。

【構成】 LiTaO<sub>3</sub>基板1上に形成した分極反転層4とプロトン交換光導波路5より形成された光波長変換素子において、電極10とヒータ11により光導波路5に印加する電界と温度を制御する。それにより、光導波路5の屈折率を制御する。温度制御により、広い範囲に渡る屈折率変調が可能となり、電界制御と組み合わせることで高速の変調が可能となった。その結果、光波長変換素子の位相整合波長が、広い範囲に渡り高速で制御できる。これによって、環境温度等によって変化する光波長変換素子の位相整合波長を制御し、安定な出力を得る。



1

2

## 【特許請求の範囲】

【請求項1】強誘電体基板と、前記基板上に形成された電界印加手段と、前記基板上に形成された温度印加手段とを備えたことを特徴とする光素子。

【請求項2】非線形光学基板と、前記基板表面に形成された周期状の分極反転層と、前記基板表面に形成された光導波路と、前記光導波路上に形成された電界印加手段と、前記光導波路の少なくとも片側に形成された温度印加手段とを有し、光導波路の屈折率が前記電界印加手段および前記温度印加手段により制御されていることを特徴とする光波長変換素子。

【請求項3】非線形光学基板と、前記基板表面に形成された周期状の分極反転層と、前記基板表面に形成された光導波路と、前記光導波路上に形成された電界印加手段と、前記電界印加手段上に形成された電気的絶縁手段と、前記絶縁手段上に形成された温度印加手段とを備え、前記光導波路の屈折率が前記電界印加手段および前記温度印加手段により制御されていることを特徴とする光波長変換素子。

【請求項4】前記電界印加手段が前記光導波路上に形成された第1の導体と、前記第1の導体膜の少なくとも片側に形成された第2の導体からなる請求項2または3記載の光波長変換素子。

【請求項5】前記電界印加手段が樹形電極からなる請求項2または3記載の光波長変換素子。

【請求項6】非線形光学基板と、前記基板表面に形成された周期状の分極反転層と、前記基板表面に形成された光導波路と、前記光導波路上に形成されたストライプ状の第1の導体と、前記第1の導体の両側または片側に形成されたストライプ状の第2の導体とを備え、前記第1および第2の導体のストラップ方向が互いにほぼ平行で、かつ前記第1の導体と前記第2の導体間に電位差を有し、なおかつ前記第1または第2の導体の少なくとも一方に電流が流れていることを特徴とする光波長変換素子。

【請求項7】前記第1または第2の導体の少なくとも一方が樹形である請求項6記載の光波長変換素子。

【請求項8】前記光導波路の少なくとも一部の表面または内部にグレーティングが形成されている請求項2、3、6いずれか1項に記載の光波長変換素子。

【請求項9】半導体レーザと、請求項2、3、6記載の何れかの光波長変換素子と、集光光学系とを備え、前記光波長変換素子の位相整合波長が、前記半導体レーザの発振波長に一致するよう、前記光波長変換素子の前記電界印加手段および温度印加手段が調整されていることを特徴とする短波長光発生装置。

【請求項10】波長選択手段と、半導体レーザと、請求項2、3、6記載の何れかの光波長変換素子と、集光光学系とを備え、前記波長選択手段により前記半導体レーザの出射光の少なくとも一部が波長選択された後、再び

前記半導体レーザに帰還されており、かつ前記光波長変換素子の位相整合波長が前記半導体レーザの発振波長に一致するよう、前記光波長変換素子の前記電界印加手段および前記温度印加手段が調整されていることを特徴とする短波長光発生装置。

【請求項11】屈折率温度係数  $d n_1 / d T (^\circ C^{-1})$  を有する非線形光学基板と、前記基板表面に形成された周期状の分極反転層と、前記基板表面に形成された光導波路と、前記光導波路の少なくとも一部の内部または表面に形成されたグレーティングと、前記グレーティング上に形成された薄膜と、半導体レーザと、集光光学系とを備え、前記薄膜の屈折率温度係数  $d n_2 / d T (^\circ C^{-1})$  が  $d n_1 / d T > d n_2 / d T$  であることを特徴とする短波長光発生装置。

【請求項12】波長選択手段として、前記光波長変換素子の前記光導波路の少なくとも一部の表面または内部に形成されたグレーティングを用いる請求項10記載の短波長光発生装置。

【請求項13】波長選択手段として、平板グレーティングを用いる請求項10記載の短波長光発生装置。

【請求項14】波長選択手段として挿帯域フィルターを用いる請求項10記載の短波長光発生装置。

【請求項15】前記薄膜が、前記グレーティングの反射波長温度係数と前記光波長変換素子の位相整合波長温度係数が等しくなる温度係数  $d n_2 / d T$  を有している短波長光発生装置。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、コヒーレント光源を応用した、光情報処理、光応用計測分野に使用される光波長変換素子および光波長変換素子を用いた短波長コヒーレント光源に関するものである。

## 【0002】

【従来の技術】非線形光学効果を利用した第2高調波発生素子（以下SHG素子とする）により、光（基本波）を半分の波長の第2高調波に変換できる。これによって半導体レーザ光を変換すると、小型の短波長光源が実現でき、印刷、光情報処理、光応用計測制御分野などに応用できるため盛んに研究が行われている。SHG素子において高効率の波長変換を実現するには、基本波と第2高調波の間で位相整合条件の成立が必要不可欠である。位相整合条件は、SHG素子の材料特性、基本波の波長等に依存するが、一般的に許容度が狭いため、条件成立には基本波波長の精密な制御が必要となる。

【0003】これを示す例として例えば、擬似位相整合（以下、QPMと記す。）方式の分極反転光導波路を用いた半導体レーザの波長変換の報告がある（山本他、Applied Physics Letters, Vol.62, No.21, 2599(1993)）。LiTaO<sub>3</sub>基板に周期状の分極反転層を有する光導波路を形成し、QPM-

SHG素子を構成している。

【0004】SHG素子は変換効率21%で31mWの青色光の発生に成功しているが、基本波の許容度は0.12nmしかなく、SHG素子の波長許容度が狭いことを示している。一方、半導体レーザの発振波長は、温度までは印加電流等によりモードホップを伴い変化する（例えば、温度変化は、0.1~0.2nm/°C、印加電流でも0.1~0.2nmのモードホップを伴い波長が変化する）ため、半導体レーザの発振波長とSHG素子の位相整合波長とを一致させることは容易ではない。

【0005】そこで、例えば図11に、示すようなグレーティングフィードバックを利用した半導体レーザの波長チューニングによる短波長光発生装置が示されている。半導体レーザーとQPM-SHG素子を用いた従来の短波長光発生装置の概略構成図を図14に示す。半導体レーザー101から放射された光は、N.A.=0.55のコリメートレンズ102により平行ビームに変換され、入／2板103で偏向方向を回転させ、N.A.=0.45のフォーカシングレンズ104により光導波路の入射部105に集光される。光導波路の出射端より出射された基本波と第2高調波はコリメートレンズ106により平行ビームに変換された後、ダイクロイックミラー107により基本波と第2高調波に分離される。

【0006】基本波はグレーティング108により波長選択された後、レンズ106、光導波路、レンズ104、102および入／2板103を通って半導体レーザ101に帰還される。グレーティング108の選択波長により半導体レーザ101の発振波長を制御できる。この結果、半導体レーザの波長変換により8mWの青色光の発生に成功し、半導体レーザの温度変化に対しても17~35°Cの間で安定なSHG出力を得ている。

【0007】グレーティングフィードバック方式としては、図14に示した外部グレーティングを利用する以外に、SHG素子にグレーティングを集積したタイプも報告されている。これを示す例として例えば、SHG素子上に誘電体のグレーティング層を形成し、光導波路を伝搬する基本波の一部をグレーティングにより波長選択し、半導体レーザに帰還させ、外部グレーティングと同様に半導体レーザの発振波長を固定するものである（特願平5-85950号）。また集積したグレーティングとしては、光導波路の内部にグレーティングを形成したタイプも報告されている（K. Shinozaki他、アプライドフィジックス・レターズ Applied Physics Letters. Vol. 59, No. 29, 510-512 (1991)）。波長1.327μmの基本波P1に対して、光導波路の長さを2mm、基本波P1のパワーを60μWにしたとき高調波P2のパワー0.652pWが得られていた。このときの変換効率は4.1%/W·cm<sup>2</sup>であった。

【0008】一方、SHG素子による半導体レーザの波長変換を行うため、SHG素子の位相整合波長を制御す

る方法がある。例えば、光導波路に電圧を印加して、電気光学効果により光導波路の屈折率を制御することにより、位相整合波長を調整し、半導体レーザの発振波長に位相整合波長を一致させる方法がある（特願平4-204815号）。

【0009】図15に電界印加により位相整合波長を調整する従来の光波長変換素子の構成図を示す。図15において110は-Z板のLiTaO<sub>3</sub>基板、111は周期状分極反転層、112はプロトン交換光導波路、113は電極、114は半導体レーザ、115は入射部である。従来の光波長変換素子においては電極の幅に関する記載は行われていなかった。電極113に電圧を印加すると光導波路にZ方向の電圧が印加される。このため、基板の有する電気光学効果により、電気光学定数 $r_{33}$ を介して光のZ方向の電界成分に対する屈折率が変化する。これによって光波長変換素子の位相整合波長が変調される。

## 【0010】

【発明が解決しようとする課題】最初に、従来の短波長光発生装置についての課題を述べる。

【0011】グレーティングフィードバックを利用した従来の短波長光発生装置では、グレーティングにより半導体レーザの発振波長を制御できるが、半導体レーザの発振波長は0.1~0.2nm毎に離散的に存在するため、波長許容度の狭い光波長変換素子（例えばQPM-SHG素子の場合、波長許容度は半値全幅で0.1nm程度）の位相整合波長と完全に一致させるのが難しく、高効率化が困難であり、出力が不安定になるという問題があった。また、光波長変換素子の温度により位相整合波長が変動するため、環境温度の変化によりSHG出力が変動するという問題があった。さらに、グレーティングを集積化した光波長変換素子では、グレーティングの反射波長に半導体レーザの発振波長が固定されるため、グレーティングの反射波長と位相整合波長を精密に一致させるのが難しく、高効率化が困難であるという問題があった。

【0012】そこで本発明は上記の点に鑑み、高効率変換が可能で、環境温度変化に対して安定な出力特性を有する短波長光発生装置を提供することを目的とする。

【0013】次に、光波長変換素子についての課題を述べる。電気光学効果を利用して、光波長変換素子の位相整合波長を調整する方法が示されている。電気光学効果による屈折率変化は応答速度が速く、高速の変調が可能であるが、変調可能な屈折率変化は10<sup>-4</sup>オーダと小さいため、変調できる位相整合波長の範囲は、1nm以下の狭い範囲に限定されるという問題があった。

【0014】一方、基板の温度を変化させることにより位相整合波長を制御することも可能であるが、温度変化による変調は応答速度が遅く、高速の変調ができないという問題があった。

【0015】そこで本発明は上記の点に鑑み、位相整合

波長が高速に変調可能で、かつ広い範囲に渡り変調できる光波長変換素子を提供することを目的とする。

【0016】

【課題を解決するための手段】上記課題を解決するため本発明では、

(1) 強誘電体基板と、前記基板上に形成された電界印加手段と、前記基板上に形成された温度印加手段とを備えた光素子である。

(2) 非線形光学基板と、前記基板表面に形成された周期状の分極反転層と、前記基板表面に形成された光導波路と、前記光導波路上に形成された電界印加手段と、前記光導波路の少なくとも片側に形成された温度印加手段とを有し、光導波路の屈折率が前記電界印加手段および前記温度印加手段により制御されて光波長変換素子である。

(3) 非線形光学基板と、前記基板表面に形成された周期状の分極反転層と、前記基板表面に形成された光導波路と、前記光導波路上に形成された電界印加手段と、前記電界印加手段上に形成された電気的絶縁手段と、前記絶縁手段上に形成された温度印加手段とを備え、前記光導波路の屈折率が前記電界印加手段および前記温度印加手段により制御されている光波長変換素子である。

(4) 非線形光学基板と、前記基板表面に形成された周期状の分極反転層と、前記基板表面に形成された光導波路と、前記光導波路上に形成されたストライプ状の第1の導体と、前記第1の導体の両側または片側に形成されたストライプ状の第2の導体とを備え、前記第1および第2の導体のストラップ方向が互いにほぼ平行で、かつ前記第1の導体と前記第2の導体間に電位差を有し、なおかつ前記第1または第2の導体の少なくとも一方に電流が流れている光波長変換素子である。

(5) 半導体レーザと、非線形光学基板と、前記基板表面に形成された周期状の分極反転層と、前記基板表面に形成された光導波路と、記基板表面に形成された光導波路と、前記基板上に形成された電界印加手段と、前記基板上に形成された温度印加手段と、集光光学系とを備え、前記光導波路の屈折率が前記電圧印加手段および前記温度印加手段により制御されている短波長光発生装置である。

(6) 波長選択手段と、半導体レーザと、非線形光学基板と、前記基板表面に形成された周期状の分極反転層と、前記基板表面に形成された光導波路と、記基板表面に形成された光導波路と、前記基板上に形成された電界印加手段と、前記基板上に形成された温度印加手段と、集光光学系とを備え、前記波長選択手段により前記半導体レーザの出射光の少なくとも一部が波長選択された後、再び前記半導体レーザに帰還されており、かつ前記光導波路の屈折率が前記電圧印加手段および前記温度印加手段により制御されている短波長光発生装置である。

(7) 屈折率温度係数  $d n_1 / d T$  ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) を有する非

線形光学基板と、前記基板表面に形成された周期状の分極反転層と、前記基板表面に形成された光導波路と、前記光導波路の少なくとも一部の内部または表面に形成されたグレーティングと、前記グレーティング上に形成された薄膜と、半導体レーザと、集光光学系とを備え、前記薄膜の屈折率温度係数  $d n_2 / d T$  ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) が  $d n_1 / d T > d n_2 / d T$  である短波長光発生装置である。

【0017】

【作用】本発明は前述した方法により、光素子に電圧印加手段と温度印加手段を同時に備えることにより光素子の屈折率を広い範囲に渡り、高速に変調できる。これは、温度印加により屈折率を広い範囲変調可能となり、しかも変調速度の遅い温度印加による変調を電界印加により補うことにより高速の変調を可能にする。さらに、粗い波長の調整は温度印加手段による変調で行い、精密な調整は電界印加手段で行うことにより、広範囲に渡り、精密な屈折率制御が可能となる。

【0018】また、電界印加手段と温度印加手段を電気的絶縁手段を挟んで積層構造にし、集積化することにより、光波長変換素子の光導波路に、効率良く電圧と温度を印加することが可能となり、低消費電力で位相整合波長を変調できる光波長変換素子が構成できる。

【0019】また、電極に電流を流すと薄膜ヒータの役割もはたすため、電極により電圧印加と温度を印加を同時にはたすことが可能となる。

【0020】また、上記の光波長変換素子と半導体レーザを組み合わせることにより、小型の短波長光発生装置を構成できる。半導体レーザから出射された光を集光光学系により光波長変換素子の光導波路に結合させ、半導体レーザの発振波長に光波長変換素子の位相整合波長が一致するよう、温度印加手段と電界印加手段により調整すると、広い温度範囲に渡り、高速に位相整合波長を変調することが可能となり、半導体レーザの光を高効率で波長変換することが可能となる。

【0021】また、温度等の環境変化により、光波長変換素子の位相整合波長または半導体レーザの発振波長が変動しても、上記手段により位相整合波長を変調することで、常に一定のSHG光が得られるため、安定な出力特性を有する短波長光発生装置を形成できる。

【0022】また、半導体レーザの発振波長を光ファイバーバックを利用して固定および制御できる。これは半導体レーザの発射光の一部をグレーティング等の波長選択手段により波長選択した後、半導体レーザの活性層内に帰還してやると、半導体レーザの発振波長が選択された波長に固定されるというものである。これを上記短波長光発生装置に応用すると、半導体レーザの発振波長が固定され、温度等の環境変化による半導体レーザの発振波長の変動を防止することが可能となる。これによって、より安定な出力特性を有する短波長光発生装置を構成できる。

## 【0023】

## 【実施例】

(実施例1) 以下本発明の実施例について説明する。

【0024】図1は、本発明の実施例の光波長変換素子の構成斜視図である。1は-C板のLiTaO<sub>3</sub>基板(結晶のC軸に垂直な面の一側)、4は分極反転層、5はプロトン交換光導波路、6は波長860nmの基本光、7は波長430nmの第2高調波(以下、SHG光と略す)、8は分極反転層の周期Λ、9は分極反転部の幅W、10は電極、11は薄膜ヒータ、12はSiO<sub>2</sub>バッファ層である。この分極反転層4の周期Λは、基本波6の波長λ、光導波路5の屈折率と形状で異なる。光導波路幅は4μm、深さは2μm、基本波6の波長λが860nmのとき、1次の周期Λが約3.8μmである。

【0025】次に、本実施例の光波長変換素子の作製方法について述べる。-C板のLiTaO<sub>3</sub>基板の表面にTa膜をスパッタリング法で30nm堆積する。フォトリソグラフィ法とドライエッチングで分極反転用周期パターンをTa膜に転写する。基板を260°Cのピロ磷酸中で20分間熱処理して、非マスク部分直下のプロトン交換を行う。その後540°Cで30秒間熱処理して周期状の分極反転層を形成する。TaマスクをHFで除去した後、酸素雰囲気中で420°C、6時間アーナー処理する。次に光導波路用スリットを形成する。基板にTaを30nm堆積した後、フォトリソグラフィ法とドライエッチングにより光導波路のパターンを形成する。260°Cのピロ磷酸中で14分間熱処理しプロトン交換を行う。その後420°Cで1分間アーナー処理して光導波路を形成する。次に電極及びヒータの形成方法を図2を用いて説明する。

【0026】(a) 分極反転層と光導波路を形成した基板表面に、SiO<sub>2</sub>膜を400nm堆積する。SiO<sub>2</sub>は電極または薄膜ヒータが光導波路の伝搬損失を増加させないためのバッファ層の役割をはたす。SiO<sub>2</sub>の厚みは、200nmでは光導波路の伝搬損失が増加したため、バッファ層として機能するには、SiO<sub>2</sub>の厚みは400nm以上必要であることが明らかになった。(b) レジストを1μm堆積し、フォトリソグラフィ法により電極およびヒータのパターンニングを行う。(c) Tiを200nm蒸着する。(d) アセトン中で洗浄してリフトオフによりレジスト上に堆積したTiを除去し、電極およびヒータのパターンを形成する。光導波路の両端面を光学研磨し素子を形成した。作製した光波長変換素子は幅10mm、長さ10mm、厚み0.5mmであった。電極は幅4μmのストライプからなり、電極間隔は3μmであった。

【0027】次に、本実施例の光波長変換素子の特性評価を行った結果について述べる。ここで、本実施例に光波長変換素子の波長変換の原理について簡単に説明する。波長変換は、非線形光学効果を利用して、基本波を高調波に変換する方法で、ここでは2次の非線形光学効果を利用して第2高調波(基本波の半分の波長)に変換

10

20

30

40

50

する。波長変換を高効率に行うには、基本波と第2高調波の光の位相を伝搬方向に対して一致させる位相整合条件を成立させなければならない。そのため、本実施例では、周期状の分極反転層からなる非線形グレーティングにより、基本波と第2高調波間の位相差を補償する擬似位相整合方式を採用した。

【0028】本方式は、グレーティングの周期を変えることで広い範囲の波長に対して位相整合条件を満足でき、かつ高効率の波長変換が行えるという特長がある。

反面、グレーティングを利用するため、位相整合の波長許容度が0.1nm程度と小さいという問題がある。さらに、非線形グレーティングの屈折率変化により位相整合波長が変化するという特徴がある。そこで、非線形グレーティングの屈折率変化による位相整合波長の制御について検討した。

【0029】最初に、ヒータ加熱による位相整合波長の変調特性を評価した。Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>レーザからの光を光導波路に入射し、SHG出力が最大になる位相整合波長を測定した。ヒータは幅100μm、厚み200nmで抵抗は500Ωであり、光導波路とヒータの距離は20μmであった。片側のヒータにのみ電力を印加し印加電力と位相整合波長との関係を求め図3に示す。

【0030】3Wの電力をヒータに印可すると位相整合波長が4nmに渡り変化した。光導波路の温度係数から計算すると光導波路の温度は約150°Cに上昇している。ヒータ加熱により広い範囲に渡り位相整合波長が制御できることがわかった。さらに、温度印可の応答速度を測定した。ヒータに印加する電圧(40V)を周期的に変化させて、位相整合波長の変調特性を測定した。その結果、数Hzオーダーの応答速度を有することが分かった。基板の面積および厚みを小さくして、基板の熱容量を1/10にすると数10Hzオーダーの応答速度が得られた。

【0031】次に、電極による位相整合波長の変調特性を評価した。LiTaO<sub>3</sub>は電気光学効果を有する材料である。電気光学効果とは電圧印加により基板の屈折率が変化する効果であり、印加する電界の方向と大きさにより、変化する屈折率の方向と大きさが結晶方向に対し、一義的に決まっている。LiTaO<sub>3</sub>の場合、結晶のz方向に電界を印加して、z方向の屈折率が変化する $r_{33}$ の電気光学定数が30pm/Vと最も大きい。そこで平行電極を図1に示す形にして、光導波路にz軸方向の電界が印加されるように配置した。平行電極に直流電圧を印加して、印加電圧と位相整合波長との関係を求めた結果を図4に示す。±50Vの電圧を印加すると、位相整合波長は0.6nm変調できた。変調の応答速度を測定したところ、数100MHz以上の応答速度を有していた。

【0032】以上示したように、ヒータ加熱による変調では変調範囲が広いが応答速度が遅い、一方、電圧による変調では高速の応答速度が実現できるが、変調範囲が狭いという問題がある。そこで、ヒータと電極に同時に

電圧を印加して、変調特性を測定した。位相整合波長変化の時間依存性を図5に示す。

【0033】(a)はヒータに2Wの電力を印加した場合、(b)はヒータに2Wの電力を印加し、同時に電極に電圧を印加した場合を示す。(a)の場合、波長が2nm変化するが、位相整合波長が設定波長に到達するまで、約2秒かかった。これは、素子温度が一定温度になるのに時間がかかるためである。そこで、温度が定常状態になるまでの、屈折率変化を電界印加により補うため、図5(b)に示すように、温度制御と同時に電極に電圧を印加した。電界による屈折率の制御は、制御範囲は狭いが高速の制御が可能となる。このため、図5(b)に示すように、0.5秒以下で素子の屈折率を設定値に到達させることができた。温度制御と電界制御を併用することで、広い範囲に渡り高速の屈折率制御が可能になった。

【0034】なお、本実施例では電極構造として平行3本電極を用いたが、平行2本電極でもZ方向の電界を光導波路に印加できる。

【0035】なお、本実施例では平行電極を用いたが、他に樹形電極を用いると、より効率よく位相整合波長を変調できる。以下にその理由を述べる。平行電極で電界を印加すると光導波路に同じ方向(Z軸方向)の電界が一様に印加される。ところが、光波長変換素子が図1に示したように周期状分極反転層からなる擬似位相整合型の場合、光導波路は周期的に分極が反転した構造をとり、分極が反転している部分では電気光学定数 $r_{33}$ の符号も逆転している。そのため、平行電極で電圧を印加すると光導波路の分極反転部分と非反転部分とでは屈折率変化の増減は逆転する。従って、電圧印加により変化する屈折率は光導波路全体で平均すると、相殺され小さくなってしまう。

【0036】一方、図6(a)に示す分極反転周期 $\Lambda$ と同じ周期を有する樹形電極対を形成すると、図6(b)に示すように、光導波路内の分極反転層に印加される電界方向は分極反転部と非反転部で逆転するため、屈折率変化は反転部、非反転部とともに同じ増減を示す。このため、電圧印加により効率よく屈折率を変化させることができた。例えば、樹形電極に、±50Vの電圧を印加すると、位相整合波長を1nmに渡り変調でき、平行電極の約2倍の位相整合波長変調が可能になった。樹形電極の歯の周期は、 $(2m-1) \cdot \Lambda$  ( $m=1, 2, 3, \dots$ ) であれば、効率よく、屈折率変化を与えることができる。

【0037】なお、本実施例ではヒータにTi薄膜を用いたが、他にCr、Ta、Wなどの高融点金属ならば何れの金属でも使用できる。また、抵抗加熱、赤外線加熱、ペルチエ素子等、基板に温度を印加できるなら、何れの方法でも使用できる。

【0038】なお、本実施例では、Tiを電極に用いた

が、他に透明電極またはAl、Au、Ag、Cr、Ni、Cu、Ta、Feなど何れの金属でも同様に用いることができる。特に透明電極を用いると電極が直接光導波路と接することにより発生する光導波路の伝搬損失が小さいため、バッファ層12を省略できて有効である。

【0039】なお、本実施例では、バッファ層にSiO<sub>2</sub>を用いたが、他にTa<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、SiNなどの誘電体、Siなどの半導体を用いることができる。特に半導体は、基板温度変化により発生する焦電効果による電界の発生を防ぎ、温度特性の向上を実現できるため有効である。

【0040】なお、本実施例では基板にLiTaO<sub>3</sub>基板を用いたが他にMgO、Nb、NdなどをドープしたLiTaO<sub>3</sub>、またはLiNbO<sub>3</sub>またはその混合物であるLiTa<sub>(1-x)</sub>Nb<sub>x</sub>O<sub>3</sub> ( $0 \leq x \leq 1$ ) 基板、そのほかKTP(KTiOPO<sub>4</sub>)でも同様な素子が作製できる。LiTaO<sub>3</sub>、LiNbO<sub>3</sub>、KTPはともに、高い非線形性を有するため、高効率の光波長変換素子が作製できる。しかも、これらの材料においては周期的分極反転層の形成方法が確認されているため、高効率の光波長変換素子が形成できる。

【0041】(実施例2) 以下本発明の光波長変換素子の他の実施例について説明する。

【0042】図7は、本発明の他の実施例の光波長変換素子の構成斜視図である。1は-C板のLiTaO<sub>3</sub>基板(結晶のC軸に垂直な面の一側)、4は分極反転層、5はプロトン交換導波路、6は波長860nmの基本光、7は波長430nmの第2高調波(以下、SHG光と略す)、8は分極反転層の周期 $\Lambda$ 、9は分極反転部の幅W、10は電極、11は薄膜ヒータ、12はSiO<sub>2</sub>バッファ層、13はSiO<sub>2</sub>バッファ層である。光導波路幅は4μm、深さは2μm、分極反転層の周期 $\Lambda$ は約3.8μmである。光波長変換素子の作製方法は実施例1とほぼ同じである。但し、電極を形成後、SiO<sub>2</sub>バッファ層を1μm堆積し、その上にヒータを形成した。

【0043】次に、図7の光波長変換素子の動作原理について説明する。電極上に絶縁膜を挟んで薄膜ヒータを形成した。絶縁膜を形成することにより、電極と薄膜ヒータが電気的に分離され、集積化が可能になる。また、ヒータと電極を積層構造に集積化することにより、ヒータによる、温度の熱伝導性が向上したため、温度印加による屈折率変調の応答速度が実施例1の光波長変換素子に比べて、約2倍早くなった。実施例1と同様に、ヒータと電極に電圧を印加し、非線形光学素子の屈折率変調を行ったところ、0.3秒で所望の屈折率に、変調することができた。ヒータと電極を層状に集積化することにより、より高速な位相整合波長の変調が可能になった。さらに、ヒータと電極を積層構造にすることにより、素子の占有面積が小さくなり、同じ面積の基板内に、約3/2倍の波長変換素子が形成できるようになった。

【0044】(実施例3) 図8は、本発明の他の実施例

の光波長変換素子の構成斜視図である。1は-C板のLiTaO<sub>3</sub>基板(結晶のC軸に垂直な面の一側)、4は分極反転層、5はプロトン交換光導波路、6は波長860nmの基本光、7は波長430nmの第2高調波(以下、SHG光と略す。)、8は分極反転層の周期Λ、9は分極反転部の幅W、14は第1の導体であるTi薄膜、15は第2の導体であるTi薄膜、12はSiO<sub>2</sub>バッファ層である。光導波路幅は4μm、深さは2μm、分極反転層の周期は約3.8μmである。

【0045】次に、図8の光波長変換素子の動作原理について説明する。第1の導体であるTi薄膜14の両端にV1の電圧を印可、第2の導体15の両端にV2の電圧を印可し電流を流すと、薄膜ヒータとして働き、光導波路に温度を印加できる。同時にTi薄膜14、15間に電位差Vを設けると光導波路に電界を印加できる。一对の電極により、電界と温度を同時に印加することができる。光波長変換素子の位相整合波長の変調特性としては、電極とヒータを積層構造に集積化したタイプとほぼ同等の特性を示した。さらに、この光波長変換素子は構造が単純で、第2の実施例の素子作製に必要であったバッファ層形成工程、薄膜ヒータ形成工程を省略できるため、作製が容易であるという特徴を有する。

【0046】なお、電極構造としては、実施例1で示した3本のストライプ構造、樹形電極構造構造でも、同様の構成が得られる。特に、樹形電極は電界制御による屈折率変化が大きいため有効である。

【0047】次に、図8の光波長変換素子の構造を用いて、光波長変換素子の位相整合許容度の拡大について検討を行った結果について述べる。

【0048】図8に示した光波長変換素子の構成において、第1の導体14に電流を流し、第2の導体15は一定電圧(この場合は接地、電圧0)とした。実験では、第1のTi薄膜のストライプ方向に40Vの電圧を印加した。Ti薄膜は、抵抗加熱による熱が発生し、ヒータとして作用した。さらに第14の導体と第2の導体15間の電界は、光導波路の伝搬方向に渡って、0から40V/3μmまで増加する。このため、光導波路の屈折率は、電気光学効果により、図9に示したように、光導波路の進行方向に渡って徐々に増加する。これによって、光波長変換素子の位相整合波長が進行方向に渡り直線的に変化することになり、素子全体の位相整合波長許容度が図10に示したように0.1nmから1nmに10倍に拡大することができた。この光波長変換素子を用いると、基本波の波長変動に対し、安定したSHG出力が得られた。

【0049】(実施例4)光素子に温度印加手段と電界印加手段を形成することにより、素子特性の安定化が図れる。ここでは、実施例2(図8)と同様の構成の光素子として光スイッチについて説明する。光導波路上に図8に示した電極構造を形成すると、安定な特性を有する光

スイッチが構成できる。

【0050】図11を用いて、光スイッチの動作原理を説明する。レーザ23から出た光を、ハーフミラー24で分岐し、一方を光スイッチ25の光導波路に集光光学系26により入射する。光導波路を通った光をコリメートし、分岐した光と合波し、検出器27で検出する。光導波路上に形成した電極に電圧を印可すると、光導波路の屈折率が変化するため、光路差が変化し、合波した光の干渉により光スイッチとして動作する。光出力を100MHzの周波数で変調できた。しかしながら、素子25の温度が変化すると、温度変化による光導波路の屈折率変化が生じ、光路長が変わるために、スイッチの特性が不安定になった。そこで、ヒータ電極に電流を流して、光素子の温度を一定に保つことにより、出力の安定性が図れ、出力変動を2%以下に抑えることができた。温度制御と電界制御が電極により同時に実行するため、安定な動作のスイッチが構成できた。

【0051】(実施例5)以下、本実施例の短波長光発生装置について説明する。

【0052】図12は、本発明の短波長光発生装置の構成斜視図である。図12において、1は-C板のLiTaO<sub>3</sub>基板(結晶のC軸に垂直な面の一側)、4は分極反転層、5はプロトン交換光導波路、6は波長860nmの基本光、7は波長430nmの第2高調波、8は分極反転層の周期Λ、9は分極反転部の幅W、10は電極、11は薄膜ヒータ、12はSiO<sub>2</sub>バッファ層、20は半導体レーザ、21は集光光学系である。光導波路幅は4μm、深さは2μm、基本波6の波長入が860nm、1次の周期Λは3.8μmであった。

【0053】半導体レーザ20から出た基本光6は集光光学系21により集光され光導波路5に入射する。入射した基本光6は光導波路5内を伝搬するが、伝搬するにつれ周期的な分極反転層4により徐々に基本光の半分の波長のSHG光に変換される。半導体レーザの発振波長は、一般的に、温度、駆動電流等の変化により変動する。例えば、0.8μm帯のファブリペロー型の半導体レーザでは0.1~0.2nm/°Cの割合で変化する。このため、通常の光波長変換素子では、位相整合波長許容度が0.1nm程度しかないと、温度制御を1°C以下に制御しないと、SHG出力は得られなかった。

【0054】ところが、実施例1の光波長変換素子を用いると、位相整合波長を最大4.6nmに渡り変調できるため、±10°Cの半導体レーザの温度変化に対しても、位相整合波長を調整することで、SHG出力を安定に保つことができた。さらに、SHG出力を検出して、SHG出力が最大になるように、ヒータと電極に印加する電圧を調整するフィードバック回路を加えた。ヒータと電極により2nmの波長範囲を数10Hzの変調速度で制御できるため、フィードバック回路により比較的速い、応答速度の変調が可能になった。その結果、SHG

出力の変動を±10℃の半導体レーザの温度変化に対して、10%以下に抑えることが可能になった。但し、半導体レーザがモードホップを起こした場合は、半導体レーザの発振波長が大きく(0.1~0.2nm)変動したため、出力は一時的に50%近く低下した。それ以外では、変動を10%以下に抑えることが可能であった。

【0055】(実施例6)半導体レーザのモードホップおよび波長変動を抑えるため、グレーティングフィードバックを利用した短波長光発生装置について説明する。

【0056】図13は、本発明の短波長光発生装置の構成斜視図である。図13において、1は-C板のLiTaO<sub>3</sub>基板(結晶のC軸に垂直な面の一側)、4は分極反転層、5はプロトン交換光導波路、22はグレーティング、6は波長860nmの基本光、7は波長430nmの第2高調波(以下、SHG光と略す)、8は分極反転層の周期Λ、9は分極反転部の幅W、10は電極、11は薄膜ヒータ、12はSiO<sub>2</sub>バッファ層、20は半導体レーザ、21は集光光学系である。出射部近傍に形成されたグレーティング22はDBRグレーティングとして働き、光導波路5を伝搬する特定波長の基本光6が反射され、集光光学系21を通って、半導体レーザ20に帰還する。半導体レーザ20の発振波長は、この帰還波長に固定されるため、半導体レーザの発振波長変動を抑えて安定化が可能となり、モードホップによる波長変動もなくなった。

【0057】本短波長光発生装置においては、半導体レーザの温度および駆動電流等による波長変動は抑えることができる。しかしながら、安定化された半導体レーザと光波長変換素子の位相整合波長の整合が必要となる。環境温度が変化すると光波長変換素子の温度特性により、位相整合波長が変化する、このため、SHG出力の安定化を図るには、光波長変換素子の位相整合波長の制御が必要となる。そこで、光波長変換素子に集積化したヒータと電極により位相整合波長を制御した。実施例1で述べたように、2nmの波長範囲を0.5秒程度で制御できるため、フィードバック回路により比較的速い、応答速度の変調が可能になった。半導体レーザの出力は100mW、光導波路に結合した光は70mWであった。このときの変換効率は14%であり、10mWのSHG出力がえられた。さらに、±20℃の環境温度の変動に対して、SHG出力の変動を5%以下に抑えることが可能になった。半導体レーザの波長変動およびモードホップを低減できたため、安定な出力の光波長変換素子の作製が可能になった。

【0058】以上のように、本実施例の短波長光発生装置により、環境温度の変化に対して、安定で高出力の青色コヒーレント光(SHG光)が得られた。その結果、光ディスク、レーザプリンタなどの光源に応用できる。この短波長光源により、光ディスクの記憶容量を大幅に増大でき、かつ非常に小型の機器が製造できる。

【0059】なお、本実施例では、短波長光発生装置を構成している光波長変換素子として、実施例1に示した光波長変換素子を用いたが、実施例2または3で示した光波長変換素子も同様に使用できる。実施例2で示した光波長変換素子は、より光効率の変調が可能で、消費電力の小さな短波長光発生装置が構成でき有効である。

【0060】なお、本実施例では、半導体レーザの波長安定化に、光導波路上に形成したDBRグレーティングを利用したが、他に、従来の実施例で説明した外部グレーティングを用いる方法がある。外部グレーティングを用いると、光導波路上に形成したグレーティングにおいて、発生する第2高調波の損失が生じないため、より高効率の短波長光発生装置が構成できるため有効である。

【0061】なお、本実施例では、半導体レーザの波長安定化に、光導波路上に形成したDBRグレーティングを利用したが、他に、狭帯域フィルターが利用できる。狭帯域フィルターを半導体レーザ光を光導波路内に集光する光学系に挿入することで、特定波長を光導波路に励起し、かつ、光導波路からの反射光を半導体レーザに帰還することで、波長安定化が図れる。狭帯域フィルターを用いると、機械的に安定な短波長光発生装置を構成できるため有効である。

【0062】(実施例7)ここでは、外部の温度変化に対して、安定な出力特性を有する光波長変換素子について説明する。

【0063】図13の短波長光発生装置において、短波長光発生装置の温度を変えて、出力の温度特性を測定した。その結果、出力は25℃で最大値をとり、温度の半値全幅は約10℃であった。この原因是、光波長変換素子の特性を測定した結果、以下のように分析された。光波長変換素子における位相整合波長の温度係数(dn/dT)は0.038nm/℃、グレーティング反射波長のdn/dTは0.028nm/℃であった。このため、光波長変換素子の位相整合波長と半導体レーザの発振波長(グレーティングの反射波長できる)の差は0.01nm/℃の温度係数を有している。光波長変換素子の位相整合波長許容度の半値全幅は約0.1nmであるから、0.1nm/(0.01nm/℃)より短波長光発生装置の温度係数は約10℃の温度許容度を有する。

【0064】以上のように、短波長光発生装置の温度係数は、位相整合波長とグレーティングの反射波長のdn/dTの差により決定される。従って、位相整合波長とグレーティングの反射波長のdn/dTを等しくすることが、可能になれば外部温度変化に対して安定な特性を有する短波長光発生装置が構成できる。

【0065】そこで、グレーティング上に、基板より温度係数の大きな膜を堆積することで、グレーティング反射波長のdn/dTを増加させ、位相整合波長とグレーティング反射波長とのdn/dTの差を小さくすることで、出力の温度特性の改善を図った。構成としては、図13に示

した短波長光発生装置と同じ構成であるが、グレーティング22の上に、PLZT ( $(\text{Pb}_{(1-x)}\text{La}_x)(\text{Zr}_y\text{Ti}_{(1-y)})_{(1-x/4)}\text{O}_3$ ) の膜を200nm堆積した。PLZTは屈折率: 約2.5で、屈折率の温度変化  $dn/dT$  は  $10 \times 10^{-5}$  である。LiTaO<sub>3</sub>基板の  $dn/dT$ :  $6.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  に比べ大きな屈折率変化を有するPLZTをグレーティング上に堆積することにより、グレーティング反射波長の温度係数は大きくなり、その結果、反射波長の温度係数  $dn/dT$  は  $0.036\text{nm}/^\circ\text{C}$  に増加した。これによって、位相整合波長とグレーティング反射波長の  $dn/dT$  の差は  $0.002\text{nm}/^\circ\text{C}$  まで低減することが可能になり、出力の温度許容度は5倍の  $50^\circ\text{C}$  に増加した。外部の温度変化に対し安定な出力特性を有する素子を構成できた。

【0066】なお、本実施例では、グレーティング上にPLZTを堆積したが、他に基板の温度変化  $dn/dT$  より大きな  $dn/dT$  を有し、かつ、光導波路を導波する光に損失を与えない膜ならば、何れの膜でもよい。膜厚を変えることで光導波路の温度係数をある程度制御できる。

【0067】なお、本実施例では、位相整合波長とグレーティング反射波長の  $dn/dT$  を整合させるため、グレーティング上にPLZTを堆積したが、グレーティング以外の部分に基板の  $dn/dT$  より小さな  $dn/dT$  を有する膜を堆積すると、位相整合波長の  $dn/dT$  が低下して、同様の結果が得られる。例えば、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、SiO<sub>2</sub> ( $dn/dT$ : 約  $0.5 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ) などの酸化膜、が使用できる。また、TiO<sub>2</sub> ( $dn/dT$ :  $-4 \sim -7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ )、PbMoO<sub>4</sub> ( $-4 \sim -7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ) などはLiTaO<sub>3</sub>基板の  $dn/dT$  と逆符号を有するため有効である。

#### 【0068】

【発明の効果】以上説明したように、光波長変換素子に電極とヒータを集積化することにより、光波長変換素子の位相整合波長を広い範囲に渡り高速で変調することができなり、その実用効果は大きい。

【0069】また、光波長変換素子に電極とヒータを積層化することにより、光波長変換素子の位相整合波長を変調する電力の低消費化が図れる。さらに素子の小型化も可能となり、その実用効果は大きい。

【0070】また、電極を電界印加とヒータとして同時に作用させることにより、光波長変換素子の位相整合波長変調の電力の低消費化が図れるとともに、作製プロセスが容易になり、かつ素子の小型化が実現するため、その実用効果は大きい。

【0071】また、位相整合波長を高速で変調可能な光波長変換素子と半導体レーザにより小型の短波長コヒーレント光源を構成することにより、安定な青色コヒーレント光を得ることができ、光ディスク、レーザプリンタへの応用が可能になり、その実用効果は大きい。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の光波長変換素子の構成斜視図

【図2】本発明の光波長変換素子の作製工程図

【図3】光波長変換素子のヒータに印加した電力と位相整合波長の関係を表す特性図

【図4】光波長変換素子の電極に印加した電圧と位相整合波長の関係を表す特性図

【図5】位相整合波長変化の時間依存性を表す図であり、(a)はヒータにのみ電力を印加した場合の特性図  
(b)はヒータと電極に同時に電圧を印加場合の特性図

【図6】光波長変換素子における電界分布を表す図であり、(a)は光波長変換素子の断面図  
(b)は光導波路に印加される電界と屈折率変化を表す特性図

【図7】本発明の他の光波長変換素子の構成斜視図

【図8】本発明の他の光波長変換素子の構成斜視図

【図9】光波長変換素子の光導波路の屈折率変化を表す特性図

【図10】位相整合特性を表す図

【図11】本発明の光素子の測定光学系を示す図

【図12】本発明の短波長光発生装置の構成図斜視図

【図13】本発明の他の短波長光発生装置の構成斜視図

【図14】従来の光波長変換素子の構成斜視図

【図15】従来の短波長光発生装置の構成斜視図

【符号の説明】

1 - C板のLiTaO<sub>3</sub>基板

4 分極反転層

5 プロトン交換光導波路

6 基本光

7 第2高調波

8 周期Λ

9 幅W

10 電極

11 ヒータ

12 バッファ層

13 バッファ層

14 電極A

15 電極B

20 半導体レーザ

21 集光光学系

22 グレーティング

23 レーザ

40 24 ハーフミラー

25 光スイッチ

26 集光光学系

27 検出器

101 半導体レーザー

102 コリメートレンズ

103  $\lambda/2$ 板

104 フォーカシングレンズ

105 入射部

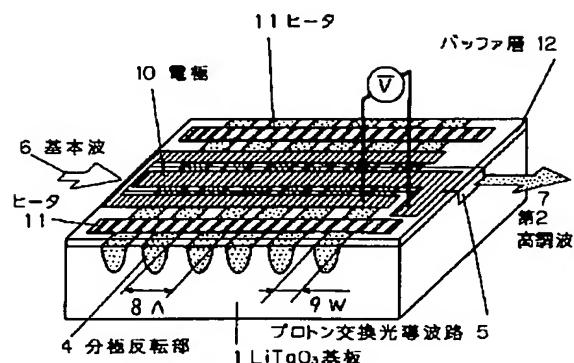
106 コリメートレンズ

50 107 ダイクロイックミラー

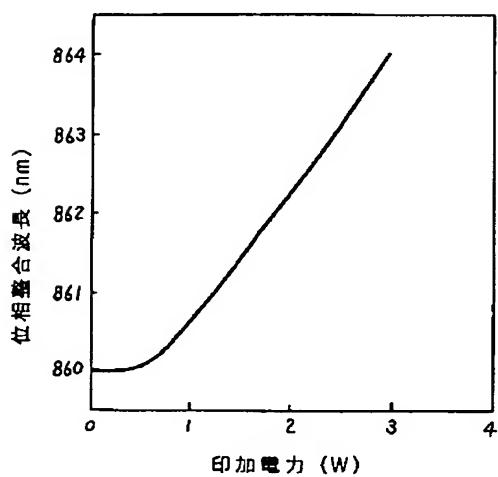
108 グレーティング  
110 LiTaO<sub>3</sub> 基板  
111 分極反転部  
112 プロトン交換光導波路

113 電極  
114 半導体レーザ  
115 入射部  
116 出射部

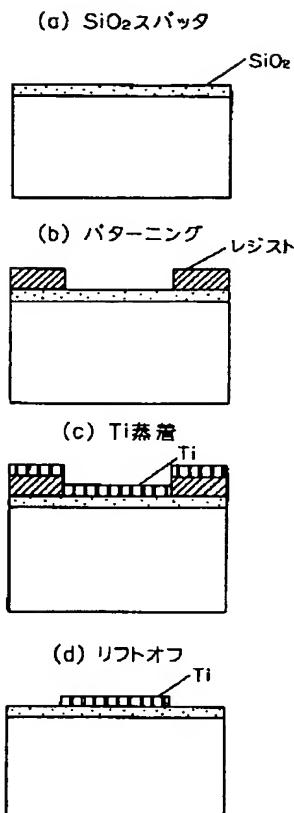
【図1】



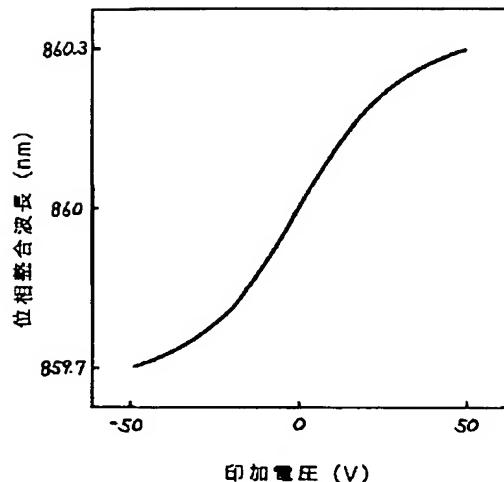
【図3】



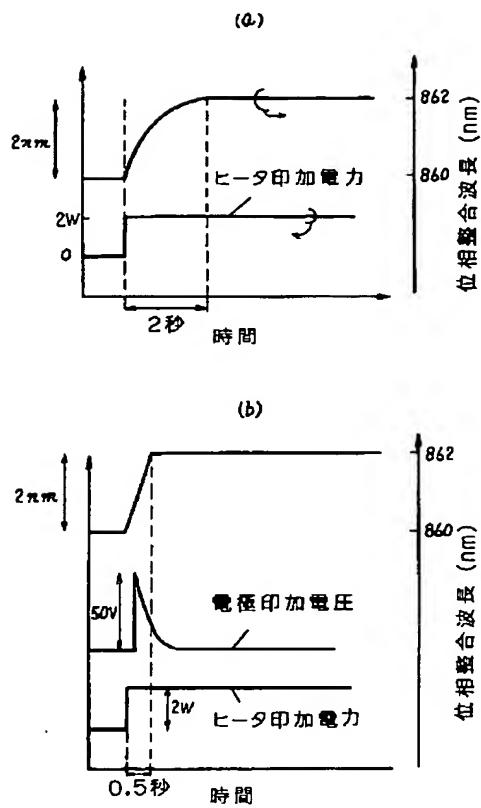
【図2】



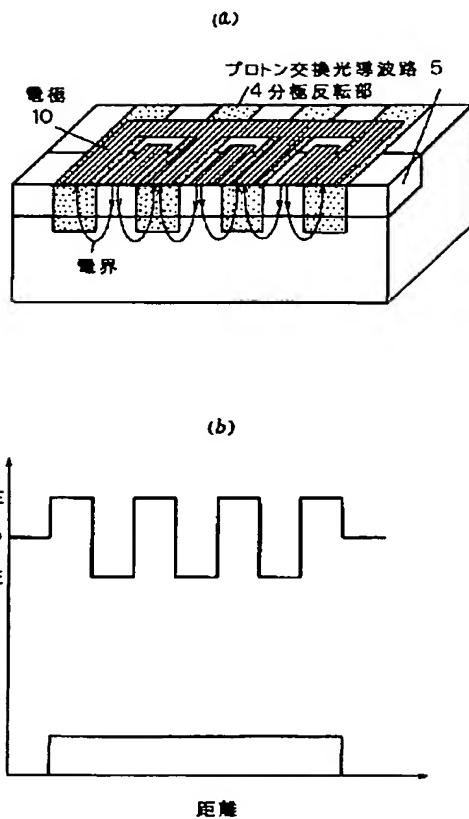
【図4】



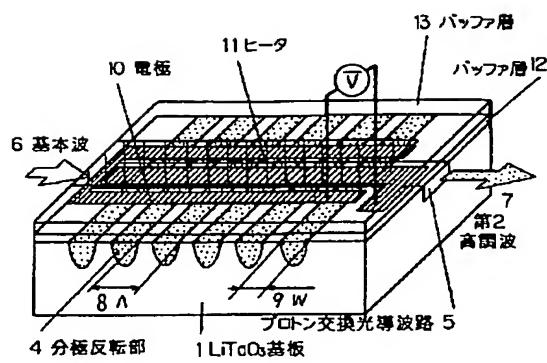
【図5】



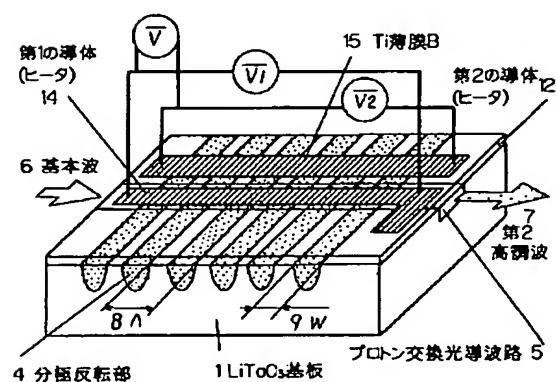
【図6】



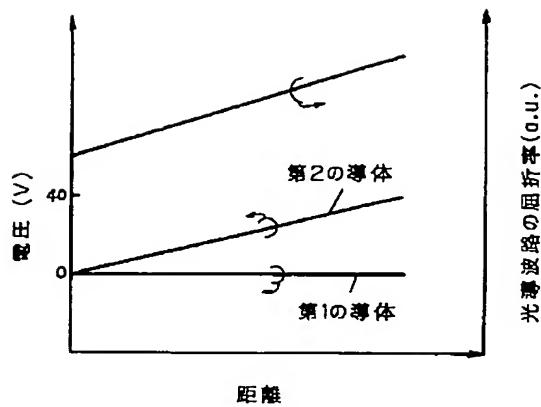
【図7】



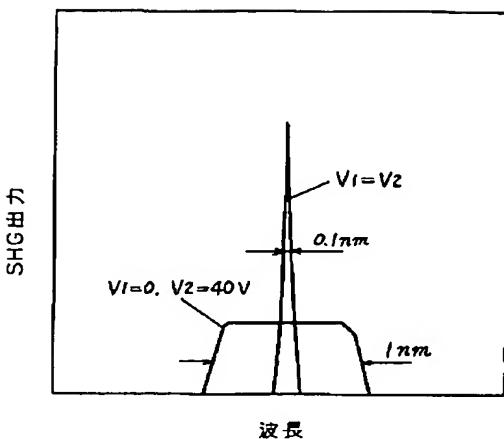
【図8】



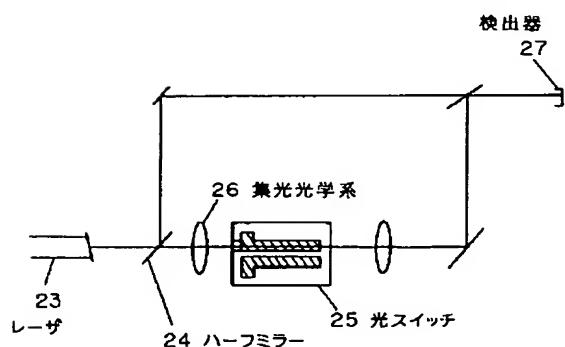
【図9】



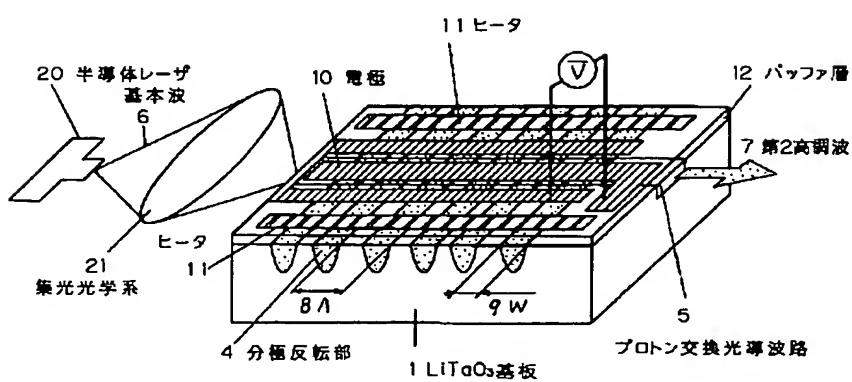
【図10】



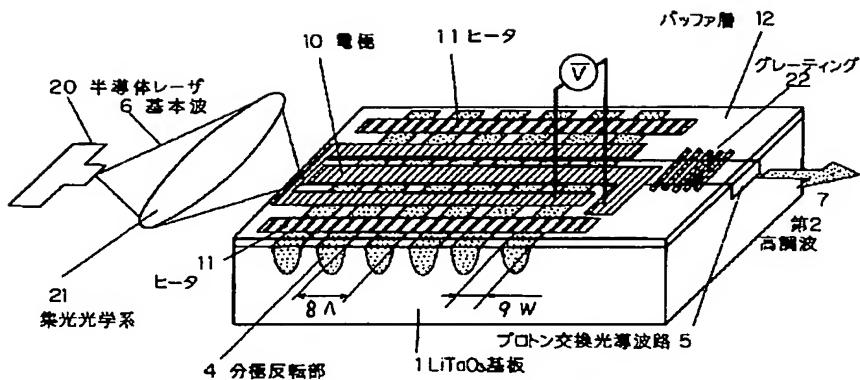
【図11】



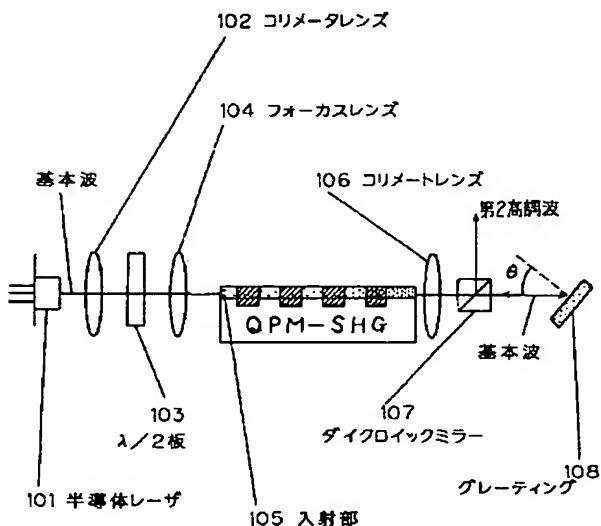
【図12】



【図13】



【図14】



【図15】

